

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ *)

А. Салам

1. ВВЕДЕНИЕ

История науки — это история поисков универсальных представлений. Последние пятьдесят лет развития физики были посвящены главным образом поискам и выяснению природы «конечных» составляющих вещества и энергии, а также развитию представлений, необходимых для понимания их взаимосвязи. Наш краткий очерк имеет своей целью изложить эти вопросы в их историческом развитии.

2. ИМПУЛЬС И ЭНЕРГИЯ

Основным достижением физики девятнадцатого столетия нужно считать установление того, что все вещества, в какой бы форме они ни были, образованы какими-либо комбинациями девятиста двух атомов различного типа — атомов H, He, Li, Be, B, C и т. д., и достижение понимания того, что, за исключением энергии движения и энергии гравитационного поля, все остальные существующие формы энергии, такие, как тепловая, световая или химическая, по своему характеру связаны с электрическими взаимодействиями.

На заре нашего века Эйнштейну удалось достичь более глубокого синтеза, когда он высказал утверждение о том, что все виды энергии обладают инерцией, что масса и энергия взаимосвязаны и что и масса и энергия есть проявление некоторой фундаментальной сущности. Это утверждение очень существенно само по себе, однако ход рассуждений Эйнштейна, приведший его к этому выводу, представляется нам гораздо более важным. Основанный на его постулатах относительно структуры пространства и времени, ход рассуждений Эйнштейна содержал практически все составляющие, которые впоследствии лягут в основу теории элементарных частиц.

Начало специальной теории относительности Эйнштейна связано с удивительным экспериментальным фактом — независимостью скорости света, измеренной наблюдателем, от скорости, которой этот наблюдатель обладает, другими словами, с обнаружением того, что скорость света является инвариантной величиной. Глубокая проникаемость Эйнштейна позволила ему осознать фундаментальную роль «инвариантных»

*) A. S a l a m, Elementary Particles, Contemporary Physics 1, № 5, 337 (1960). Перевод В. А. Угарова. Мы обращаем внимание читателей на ранее опубликованную в УФН статью Гелл-Манна и Розенбаума (УФН 64, 391, вып. 2 (1958)), где в том же стиле изложены некоторые вопросы, которые в статье Салама затронуты весьма бегло. Свежие цифровые данные можно найти в предыдущей статье этого выпуска.

Таблица элементарных частиц (1959 г.)

Частица	Масса покоя	Спин	I_z	Время распада, сек	Продукты распада	Античастица	
1	γ	0	± 1	∞	Устойчив	γ	
2	ν	0	$-1/2$	∞	Устойчиво	$\bar{\nu}$ (со спином $+1/2$) e^+ μ^+	
3	e^-	1	$\pm 1/2$	∞	Устойчив		
4	μ	207	$\pm 1/2$	10^{-6}	$e + \nu + \bar{\nu}$		
5	π^+	273	0	1	10^{-8}	$\mu^+ + \nu$ 2γ	$\pi^- (I_z = -1)$ π^0
6	π^0	264	0	0	10^{-16}		
7	K^+	966	0	$1/2$	10^{-8}	$\mu^+ + \nu, 2\pi, 3\pi$	$K^- (I_z = -1/2)$
8	K^0	966	0	$-1/2$	10^{-10}	$\pi^+ + \pi^-, \pi^0 + \pi^0$	$K^0 (I_z = +1/2)$
9	p^+	1836	$\pm 1/2$	$1/2$	∞	Устойчив	\bar{p}
10	n^0	1839	$\pm 1/2$	$-1/2$	10^3	$p + e^- + \bar{\nu}$	\bar{n}
11	Λ^0	2180	$\pm 1/2$	0	10^{-10}	$p + \pi^-, n + \pi^0$	$\bar{\Lambda}^0$
12	Σ^+	2345	$\pm 1/2$	1	10^{-11}	$p + \pi^0, n + \pi^+$	$\bar{\Sigma}^+$
13	Σ^0	2331	$\pm 1/2$	0	10^{-18}	$\Lambda^0 + \gamma$	$\bar{\Sigma}^0$
14	Σ^-	2331	$\pm 1/2$	-1	10^{-10}	$n + \pi^-$	$\bar{\Sigma}^-$
15	Ξ^0	2590	$\pm 1/2$	$1/2$	10^{-10}	$\Lambda^0 + \pi^0$	$\bar{\Xi}^0$
16	Ξ^-	2590	$\pm 1/2$	$-1/2$	10^{-10}	$\Lambda^0 + \pi^-$	$\bar{\Xi}^-$

величин при описании физических явлений. Ему удалось показать, что постоянство скорости света влечет за собой то, что ни пространственное расстояние r между двумя смежными событиями, ни промежуток времени между этими событиями в отдельности не имеют инвариантного значения. Напротив, как это было им же доказано, лишь некоторая физическая величина имеет одинаковое численное значение для всех наблюдателей, независимо от их собственного движения; этой величиной является квадрат расстояния в четырехмерном пространстве-времени, определяемый выражением $s^2 = r^2 - c^2 t^2$. Существенно здесь то, что время и пространство выступают лишь как аспекты фундаментальной сущности. Далее, поскольку импульс и энергия свободно движущейся частицы представляют собой физические величины, впервые определенные Ньютоном и его последователями в восемнадцатом веке, так что они обладают теми же «трансформационными свойствами», что и пространство r и время t соответственно, то весьма вероятно ожидать, что энергия и импульс (подходящим образом определенные) образуют два аспекта одного и того же (ковариантного) единства. В этом случае основным инвариантом, соответствующим:

«пространственно-временному расстоянию», будет масса покоя частицы. Она и представляет собой некую реальность, имеющую одно и то же значение для всех наблюдателей. Говоря точнее, если p — импульс, а E — энергия, то

$$E^2 - c^2 p^2 = + m^2 c^4,$$

где m — (постоянная инвариантная) масса покоя движущейся частицы. Именно эйнштейновское требование к «трансформационным свойствам» физических величин дает ключ к правильному их определению, которое и позволяет заложить основы любой теории в современной физике.

3. ЭЛЕКТРОН, ПРОТОН И ФОТОН

Возвращаясь к открытию элементарных частиц, мы должны сказать, что история начинается открытием электрона (в 1897 г.) Дж. Дж. Томсоном и протона (в 1911 г.) Э. Резерфордом. Однако примерно в 1914 г., в тот момент, когда деятельность Кавендишской лаборатории достигла наивысшего расцвета, казалось, что на этом история элементарных частиц закончится; в то время считали, что все, из чего состоит мир, — все 92 известных атома — образовано именно этими двумя устойчивыми, неделимыми и неразрушимыми частицами. Эти две частицы, как это уже тогда выяснилось, обладали следующими свойствами:

1) Электрон — мельчайший кусочек вещества, с массой покоя 10^{-27} г; масса покоя протона в 2000 раз больше.

2) Электрон обладает отрицательным электрическим зарядом, равным $4,8 \cdot 10^{-10}$ CGSE; протон имеет положительный заряд, в точности той же самой величины.

К этому списку вскоре добавилась третья элементарная частица — фотон. Планк и Эйнштейн пришли к выводу о том, что энергия электромагнитного излучения существует в форме отдельных порций — дискретных квантов, которые были названы Эйнштейном фотонами. С этой (почти что ньютоновской) точки зрения луч света состоит из потока частиц — фотонов, каждый из которых перемещается со скоростью света.

Поскольку все наши представления в физике элементарных частиц фактически опираются на пример этих трех частиц — электрона, протона и фотона, — вполне уместно рассмотреть их взаимодействие подробнее.

Согласно электромагнитной теории Максвелла, любая заряженная частица, ускоряемая электрическим полем, испускает или поглощает электромагнитное излучение. Согласно Планку и Эйнштейну, электромагнитное излучение существует в виде фотонов. Это означает, что при ускорении электронов или протонов ими испускаются или поглощаются фотоны. На рис. 1 мы воспроизводим пространственно-временную диаграмму такого процесса испускания или поглощения фотона: на

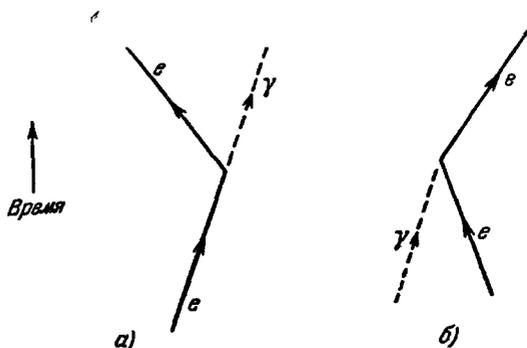


Рис. 1. а) испускание и б) поглощение фотона электроном.

рис. 1, а электрон (сплошная линия) испускает фотон (пунктир), на рис. 1, б электрон поглощает фотон.

В теории Максвелла взаимодействие заряженных частиц может быть описано следующим образом: во-первых, частица создает в окружающем ее пространстве электромагнитное поле; это поле в свою очередь уже действует на вторую заряженную частицу. Этот процесс может быть представлен как испускание одного или нескольких фотонов одним электроном и их абсорбция вторым (рис. 2).

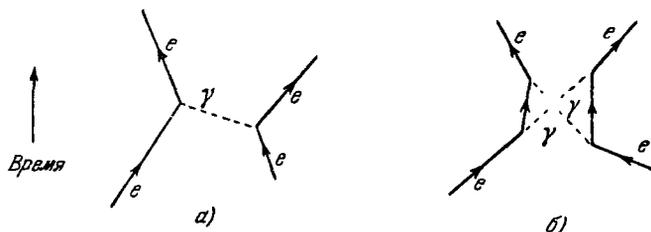


Рис. 2. Отталкивание между электронами и реабсорбция фотонов.

а) Один фотон; б) два фотона.

Испускание и поглощение фотонов и их обмен между двумя электронами или между электроном и протоном должны удовлетворять определенным законам сохранения:

1. В любом физическом процессе

- а) полный заряд (Q),
- б) число электронов (N_e),
- в) число протонов (N_p)

должны оставаться неизменными до и после взаимодействия. Так как фотоны свободно испускаются и поглощаются электронами и протонами, то их число в процессе эксперимента может изменяться.

2. В любом физическом процессе

- а) полная энергия E ,
- б) полный импульс P ,
- в) полный угловой импульс J

должны оставаться неизменными до и после взаимодействия*).

Приведенные выше законы, так называемые законы сохранения, — законы эмпирические. Три первых из них выражают факт неразрушимости или целостности протона или электронов. Три последних закона обладают важными особенностями для наших представлений о структуре пространства и времени. Закон сохранения энергии и линейного импульса подразумевает, что результаты эксперимента не зависят от того, в каком месте пространства и в какой момент времени производится этот эксперимент. Другими словами, пространство и время обладают т р а н с л я ц и о н н о й с и м м е т р и е й. Из закона сохранения углового импульса можно прийти к выводу, что если экспериментальная установка повернулась на некоторый угол, то этот поворот не скажется на результатах

*) Приведем точную формулировку законов сохранения энергии и импульса. Рассмотрим столкновение протона с электроном. Пусть m_e — масса покоя электрона, \mathbf{k}_e — импульс электрона до и \mathbf{k}'_e — после столкновения; m_p , \mathbf{k}_p , \mathbf{k}'_p — соответствующие величины для протона. Тогда

$$\mathbf{k}_e + \mathbf{k}_p = \mathbf{k}'_e + \mathbf{k}'_p,$$

$$\sqrt{m_e^2 c^2 + k_e^2} + \sqrt{m_p^2 c^2 + k_p^2} = \sqrt{m_e^2 c^2 + k_e'^2} + \sqrt{m_p^2 c^2 + k_p'^2}.$$

измерения; тем самым устанавливается принцип вращательной симметрии пространства.

Разумеется, можно исходить из вполне правдоподобного предположения о том, что результаты эксперимента не зависят от того, где они производятся, и что структура пространства — времени такова, что она инвариантна по отношению к трансляциям и вращениям; тогда можно вывести, что в каждом данном эксперименте полная энергия, линейный импульс, а также угловой импульс должны сохраняться.

В известном смысле, физика элементарных частиц на данной стадии еще раз подтверждает правильность исходных представлений о пространстве и времени в специальной теории относительности Эйнштейна.

4. ЭЛЕКТРОН ДИРАКА

Для того чтобы закон сохранения углового количества движения мог давать в качественном отношении все необходимые следствия, оказалось необходимым приписать каждой элементарной частице внутренний угловой момент, который принято называть внутренним спином частицы, или просто спином. Рассмотренным частицам приписываются следующие спины: фотону — единица, электрону — $\frac{1}{2}$ единицы, и, наконец, протону — также $\frac{1}{2}$ единицы. Единицей для измерения спинов служит величина $\hbar/2\pi$, где \hbar — постоянная Планка; эту единицу часто записывают в виде \hbar .

В качестве наглядной модели можно представлять себе электрон или протон как вращающийся волчок. Спиновая ось вовсе не закреплена в самой частице. Но выбор такой оси зачастую напрашивается сам собой; например, если мы рассматриваем движущийся электрон, обладающий импульсом p , то направление импульса будет вполне подходящей осью отсчета. И в пучке таких свободных электронов половина электронов будет вращаться по направлению правого винта относительно вектора p , а другая половина — в направлении левого винта.

Как становится очевидным из рис. 3, электрон, обладающий правым вращением (или, иначе, правополяризованный электрон), — это зеркальное отражение левовращающегося, или левополяризованного электрона.

Вернувшись к связи между законом сохранения углового момента и структурой времени — пространства, Дирак сумел показать в 1928 г., что внутренние спины элементарных частиц и, в частности, полуполые спины электронов и протонов появляются довольно естественным образом, если рассмотреть пространственно-временную (или лоренцевскую) симметрию вращения, а не обычную пространственную симметрию вращения.

Дирак начал с попытки написать уравнение движения для свободного электрона или протона. У него был единственный определяющий признак: уравнение должно было быть инвариантным (по Лоренцу), другими

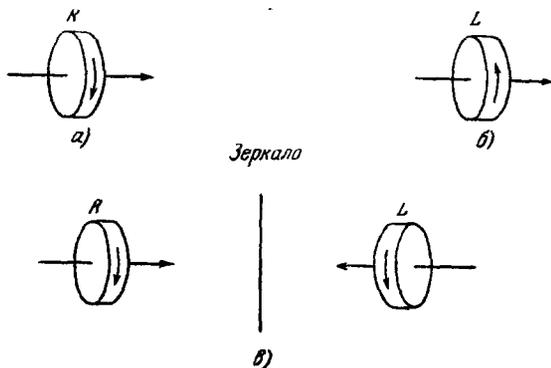


Рис. 3. Поляризация относительно оси, отмеченной длиной стрелкой.

а) Правая поляризация; б) левая поляризация; в) левая поляризация представляет собой зеркальное изображение правой поляризации.

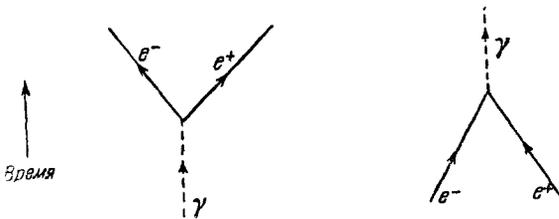
словами, внутренние свойства частицы должны представляться тождественными для движущегося и для неподвижного наблюдателя. Дираку удалось написать такое уравнение. Но первой неожиданностью оказалось то, что частица, которая описывалась этим уравнением, должна обладать внутренним спином, равным половине единицы, хотя при построении уравнения Дирак вовсе и не помышлял о поисках частиц со спином. Однако оказалась и вторая неожиданность. Полученное уравнение описывало не только электроны (или протоны), для которых оно предназначалось; выяснилось, что оно описывает частицы той же самой массы и с тем же самым спином, что и электроны, но обладающие отрицательной энергией (т. е. частицы с импульсом p и энергией $E = -\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$ вместо $E = +\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$). Таких частиц никогда еще в природе не встречалось; если такую частицу толкать в направлении от экспериментатора, частица начнет двигаться к экспериментатору. В электрическом поле, ускоряющем «нормальные» электроны, электроны с отрицательной энергией будут замедляться (в силу того, что они обладают отрицательной энергией). Таким образом, уравнение Дирака, подобно сказочному яичку, оказалось добротным только отчасти.

В течение нескольких лет существовал заговор молчания относительно этих неприятных решений релятивистского уравнения Дирака. Выход был найден самим же Дираком в 1934 г. Он предложил принять все решения релятивистского уравнения и считать их соответствующими действительности. Электроны с отрицательной энергией могут существовать с не меньшим правом, чем электроны с положительной энергией. Реально должен даже существовать такой избыток этих частиц, что в нормальном состоянии вселенной любое мыслимое состояние с отрицательной энергией должно быть заполнено электронами с отрицательной энергией. Дирак назвал это (ненаблюдаемое) образование отрицательной энергии электронов «морем» отрицательной энергии. Подумаем о том, что произойдет, когда один из электронов этого «моря» поглотит фотон (обладающий положительной энергией), так что его полная энергия после поглощения фотона окажется положительной. Тогда он будет вести себя, как нормальный электрон с положительной энергией. Однако, осуществив такой переход, этот электрон оставит на своем месте вакансию — дырку в отрицательном «море». Такая дырка, означающая отсутствие отрицательной энергии, так же как и отсутствие отрицательного электронного заряда, подразумевает наличие положительно заряженной частицы, обладающей положительной энергией и имеющей ту же самую массу, что и электрон. Эта

дырка представляет собой «позитрон», замедляемый, как это и должно быть, в электрическом поле, которое ускоряло бы нормальные отрицательно заряженные электроны; на этот раз различие возникает вследствие положительного заряда дырки.

Рис. 4. а) Электронно-позитронная пара, порожденная фотоном; б) электронно-позитронная пара, аннигилирующая с испусканием фотона.

Очень важно уяснить себе, что в картине, предложенной Дираком, невозможно создать дырку (позитрон) без того, чтобы одновременно не получить обычный электрон (тот самый электрон, который удаляется из дырки). Обратное, столкновение электрона и позитрона может привести к заполнению дырки в «море» отрицательной энергии, так что обе частицы — электрон и позитрон — должны



одновременно исчезнуть. Пространственно-временная диаграмма, приведенная на рис. 4, иллюстрирует этот процесс.

«Море», придуманное Дираком, так же как и отдельные пространственно-временные диаграммы, приведенные выше, — все это лишь наглядные способы описания. Изюминка работы Дирака заключена, однако, в важном открытии: как следствие релятивистской инвариантности все частицы в природе должны существовать парами; так что каждой частице соответствует своя античастица, имеющая точно такую же массу и точно такой же спин, но с зарядом противоположного знака. Таким образом, существование отрицательных электронов влечет за

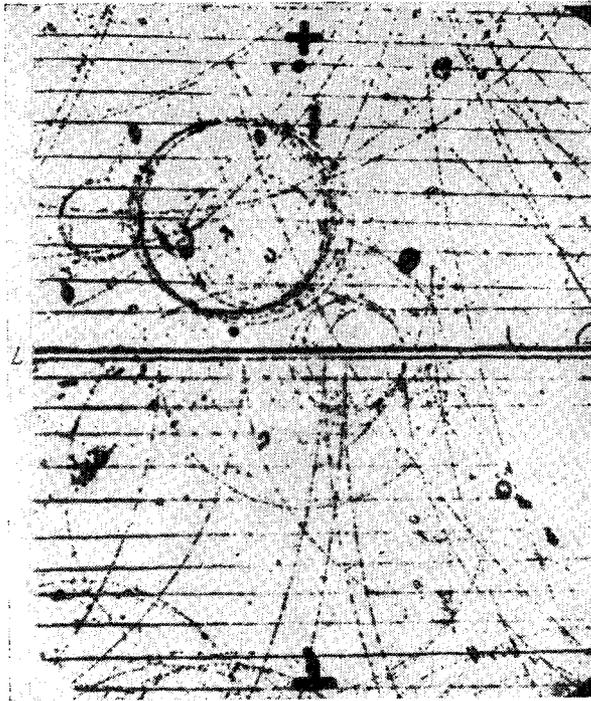


Рис. 5. Треки электронно-позитронных пар, порожденных в свинцовой пластинке LL, перегорживающей камеру Вильсона, γ -излучением, идущим из верхней части рисунка.

Видны четыре трека пар, имеющих вид перевернутой буквы V, начинающейся в LL.

собой существование положительных электронов; поскольку существуют протоны, должны существовать и антипротоны. Существование атома водорода указывает на то, что может существовать атом антиводорода, обладающий в точности теми же энергетическими уровнями.

Работа Дирака была одной из самых значительных работ в истории физики. Она вскрыла глубокую симметрию в природе, она указала механизм, которым обеспечивается создание электронно-позитронных пар или их одновременная аннигиляция. Разумеется, мы можем видоизменить два принятых нами закона сохранения $N_e = \text{const}$ и $N_p = \text{const}$, записав их в виде

$$N_e - N_{\bar{e}} = \text{const}, \quad (\text{I})$$

$$N_p - N_{\bar{p}} = \text{const}, \quad (\text{II})$$

где символами e и p обозначены позитроны и антипротоны. Позже мы

убедимся в том, что эти законы применимы соответственно ко всем видам лептонов (частицам со спином $\frac{1}{2}$, малой массой, подобным электрону) и всем видам барионов (тяжелым частицам со спином $\frac{1}{2}$, подобным протону), однако общепринятая терминология может быть введена уже здесь. Впредь я буду называть закон (I) законом сохранения лептонов, а закон (II) законом сохранения барионов. Блестящее открытие генерации электронно-позитронных пар фотонами космических лучей, сделанное в 1932 г. Андерсоном и Блекеттом, фактически предшествовало идеям Дирака и дало веское доказательство закона симметрии частиц и античастиц. На рис. 5 показано образование пар фотонами, проходящими через свинцовую пластинку, помещенную в камеру Вильсона. Фотоны, не обладающие электрическим зарядом, следов в камере не оставляют. Хорошо видны пары частиц; треки электронов искривляются вправо, треки позитронов — влево. Для того чтобы треки этих частиц искривлялись, камера Вильсона была помещена в сильное магнитное поле. Так как электроны и позитроны имеют заряды противоположного знака, их треки искривляются в противоположных направлениях.

Работа Дирака является столь значительной вехой в физике элементарных частиц, что мы должны были остановиться на ней достаточно детально. Один из важнейших выводов, продемонстрированных этой работой, состоял в том, что, исходя из правильных физических идей, можно положиться на все математические следствия, вытекающие из основанной на этих идеях работы.

В Кембридже ходит легендарная история о том, как Дираку пришла в голову мысль интерпретировать дырки в «море» отрицательной энергии как реальные физические частицы. Как гласит эта история, Дирак в студенческие годы участвовал однажды в рождественском конкурсе задач, ежегодно организуемом Кембриджским студенческим математическим обществом — архимедианцами. Одна из задач была следующей:

Трое рыбаков рыбачили в темную, ненастную ночь. Вместе с уловом они остались на необитаемом острове, чтобы дожидаться утра. В середине ночи буря утихла, и один из рыбаков решил покинуть остров, захватив с собой свою треть улова. Ему не хотелось будить остальных. Он обнаружил, что может разделить добычу на три равные части, но при этом одна рыба окажется лишней. Выбросив эту лишнюю рыбу в море и забрав свою треть, он покинул своих спящих товарищей. Вскоре после этого проснулся второй рыбак, который совсем не подозревая о том, что один из его товарищей уже ушел, снова начал делить улов. Как и первый рыбак, он разделил всю рыбу на три равные части и также обнаружил, что одна рыба остается лишней. Выбросив эту лишнюю рыбу в море, он забрал свою часть улова и ушел. Точно такую же операцию проделал третий рыбак, когда он проснулся несколько часов спустя; он снова поделил оставшуюся рыбу на три равные части, и опять же у него оказалась одна лишняя рыба. Задача состояла в том, чтобы найти минимальное число рыб, которое удовлетворяло бы условиям этой задачи.

Ответ Дирака состоял в том, что минимальное число рыб было равно минус двум, потому что вне всякого сомнения минус две рыбы можно разделить на три равные части, по минус единице каждая, так, что плюс одна рыба остается лишней. Если выкинуть эту лишнюю (+1) рыбу в море и забрать долю, приходящуюся на одного человека (−1 рыбу), то в итоге опять останутся минус две рыбы для второго рыбака, который начнет аналогичное деление, и так далее.

5. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ, СВЯЗАННЫЕ С РАЗМЕРАМИ ЧАСТИЦ

Впечатляющий успех идей Дирака породил чудовищное ощущение благополучия. Правда, существовали не очень приятные вопросы, требующие ответа. Из экспериментального факта, состоящего в том, что во всяком физическом процессе легкие частицы или тяжелые частицы никогда

не возникают и никогда не появляются поодиночке, вытекает, что эти частицы в известном смысле неразрушимы. Поэтому вопрос о том, из чего состоят эти самые частицы, казалось бы, можно считать улаженным. Однако остается вопрос, на который мы не получили ответа: следует ли рассматривать электроны и протоны как точечные частицы или же их следует считать образованиями, обладающими определенными размерами, например принять их за крошечные заряженные сферы. Структура частиц теснейшим образом связана с их массой покоя. Если электрон считать заряженной сферой радиуса a , то электростатическая энергия, приобретаемая при образовании такой структуры, грубо говоря, имеет порядок отношения e^2/a . Можно интерпретировать массу покоя электрона как (инерциальное) проявление этой запасенной энергии, откуда можно получить (на основании уравнения $e^2/a \sim mc^2$) значение радиуса a ; оно оказывается равным 10^{-13} см. Таким образом, можно решить проблему массы электрона, но мы немедленно оказываемся перед новой неразрешенной дилеммой. Если электрон в самом деле представляет собой заряженную сферу, то почему он не разрывается на части из-за электростатического отталкивания между его отдельными частями? Какие причины обуславливают появление экстрасил связи, сдерживающих электрон как единое целое.

Теория Дирака полностью игнорирует проблему строения электрона; в духе предыдущих рассуждений мы можем сказать, что теория Дирака — это теория точечного электрона ($a \rightarrow 0$), принципиально содержащая в себе бесконечную собственную массу. Если иметь в виду достижения этой теории при интерпретации многочисленных экспериментальных результатов, становится еще более непонятным, как можно примириться со столь неприятным обстоятельством, как бесконечная собственная масса.

Период между 1947 и 1949 гг. физики-теоретики были заняты реинтерпретацией и переоценкой именно этих проблем собственной энергии. Эта деятельность была особенно стимулирована открытием лэмбовского смещения, и триумфом теории этого периода явилось установление того, что незначительное смещение $2P$ - и $2S$ -уровней водородного атома возникает в силу того, что собственная энергия видоизменяет закон Кулона на малых расстояниях (порядка 10^{-13} см). Однако эта увлекательная история заняла бы слишком много места и увела бы нас в сторону, поэтому мы на ней не останавливаемся.

Но что можно сказать относительно экспериментального определения радиусов электрона и протона? Стоит напомнить, как удалось Резерфорду показать наличие крохотного ядра в центре относительно расплывчатой структуры, какой является атом. Резерфорд пришел к выводу о том, что положительный заряд в атоме занимает крохотный объемчик внутри атома, на основе своих экспериментов по рассеянию α -частиц на атомах. Он неожиданно обнаружил непропорционально большое число α -частиц, рассеянных назад, что, по его словам, было так же удивительно, как «пушечные снаряды, отскакивающие от листа бумаги». Эти опыты по рассеянию дали ключ к установлению размеров ядра. Естественно, чтобы найти размеры протона, нужно попытаться действовать аналогичным путем; например, можно исследовать рассеяние энергичных электронов на протонах. Такого рода эксперименты были выполнены недавно Хофштатером с сотрудниками в Стенфорде; из этих экспериментов, по-видимому, вытекает, что протон и в самом деле имеет аномально большой радиус заряда, порядка 10^{-13} см. Как возникает этот громадный радиус? Почему протон должен обязательно обладать «плотным» облаком заряда? Чтобы ответить на эти вопросы, мы должны заглянуть еще куда-то, за пределы электродинамики.

6. РАСПАД НЕЙТРОНА И НЕЙТРИНО

Это «еще куда-то» оказалось ядерной физикой. Мы уже упоминали о том, что электронно-электронные, электронно-позитронные и электронно-протонные силы могут быть количественно истолкованы исчерпывающим образом на основе предположения о том, что при достаточном сближении эти частицы обмениваются между собой фотонами.

Следующий шаг в физике элементарных частиц был сделан тогда, когда стало ясно, что протонно-протонные силы лишь частично объясняются вышеуказанным способом. Когда протоны сближаются на расстояния меньше 10^{-13} см, то между ними возникают значительно большие силы, чем это предполагалось; эти силы в сто раз больше электромагнитных сил. Примерно в то же самое время был открыт нейтрон, шестая по счету элементарная частица, и отпали всякие сомнения в том, что атомные ядра состоят приблизительно из одинакового числа протонов и нейтронов. Массы протона и нейтрона почти одинаковы; силы, действующие между протоном и нейтроном, с высокой степенью точности равны силам, действующим между двумя протонами. Фактически нейтрон и протон можно рассматривать как два состояния (незаряженное и заряженное) одной и той же исходной частицы.

Нейтрону было суждено оживить ситуацию весьма своеобразным и неожиданным образом. Нейтрон чуть тяжелее протона, и приблизительно через двенадцать минут свободный нейтрон распадается на протон и электрон. Этот процесс носит название β -распада. В первый момент казалось, что при таком распаде не сохраняются ни энергия, ни импульс, ни вращательный импульс. Наступило время, когда физики-теоретики должны были подвергнуть испытанию свои представления, которые они сами создали и которым свято верили. Если бы мы не захотели подвергать ревизии законы сохранения, то следовало бы пересмотреть основные представления относительно структуры пространства — времени. Чтобы разрешить эту дилемму, Паули (в одном из писем) предположил, что при β -распаде, кроме протона и электрона, испускается еще одна нейтральная частица с массой покоя, равной нулю; эта частица уносит с собой недостающую энергию, недостающий импульс и недостающий угловой импульс. Этой частице дали свое имя — нейтрино. Таким образом, открытие нейтрона одновременно представило нашим взорам сразу две частицы — сам нейтрон (его принято обозначать буквой n) и нейтрино. Нейтрино символически отмечается буквами $\bar{\nu}$ или ν , разница между которыми будет пояснена впоследствии.

Но все же, элементарная частица нейтрон или нет? Частицы, с которыми мы имели дело до сих пор, — электроны, протоны, фотоны и даже нейтрино — все были устойчивыми, неделимыми и неразрушимыми. Совсем не так обстоит дело с нейтроном. Правда, в ядерных масштабах времени распад нейтрона представляется весьма медленным процессом. Можно показать непосредственным применением принципа неопределенности, что те виды пространственно-временных событий, с которыми мы уже имели дело, — испускание и поглощение фотона (см. рис. 1), осуществляются за времена порядка 10^{-19} сек. С точки зрения этих временных масштабов, распад нейтрона, происходящий за промежуток времени около 10^9 сек, и в самом деле представляется крайне замедленным процессом. Тем не менее сам факт распада остается и вынуждает нас пойти на компромисс. Этот компромисс заключается в следующем: мы подразделяем все основные взаимодействия на три класса.

1) Сильные ядерные взаимодействия, которые обуславливают силы между протонами и нейтронами ($p-n$), протонами

и протонами ($p-p$) и нейтронами и нейтронами ($n-n$). Эти взаимодействия — самые сильные из всех тех, которые встречаются в природе.

2) Э л е к т р о м а г н и т н ы е в з а и м о д е й с т в и я, обуславливающие появление сил между протонами и электронами ($p-e$) и между электронами ($e-e$). Эти силы имеют среднюю величину.

3) С л а б ы е в з а и м о д е й с т в и я, ответственные за распад нейтрона, а также некоторые другие процессы, которые будут кратко упомянуты ниже.

Приведем классификацию взаимодействий:

	1. Сильное	2. Электромагнитное	3. Слабое
Относительная сила взаимодействия	1	10^{-2}	10^{-12}
	$\left. \begin{matrix} p-p \\ p-e \\ n-n \end{matrix} \right\}$ -силы	$\left. \begin{matrix} p-e \\ e-e \end{matrix} \right\}$ -силы	$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$ -распад

Относительная сила этих взаимодействий дается отношением $1 : 10^{-2} : 10^{-12}$. В той степени, в какой можно пренебречь слабыми взаимодействиями, нейтрон можно считать элементарным, устойчивым и неделимым. В той степени, в которой можно пренебречь электромагнитным взаимодействием, протон и нейтрон тождественны. В этом смысле все частицы являются элементарными, но некоторые из них более элементарны, чем другие.

7. МЕЗОНЫ

Частицы, упомянутые в заголовке, возвращают нас к 1935 г., когда Юкава стал размышлять над проблемой специфических ядерных сил, так называемых $p-n$ -сил. Мы уже говорили о том, что электромагнитное взаимодействие заряженных частиц можно представить как результат обмена фотонами. Юкава указал, что в полной аналогии с электромагнитным взаимодействием силы между протонами и нейтронами могут быть обусловлены обменом некоторыми, неизвестными в то время частицами, которые были названы Юкавой мезонами. Поясним возникновение этих сил простым примером. Вдоль дороги идут двое. Допустим, что, двигаясь по дороге, они должны все время перебрасывать друг другу крокетный шар. Это вынуждает их не отходить друг от друга дальше некоторого определенного расстояния. Если издали смотреть на этих людей так, что перекидываемого шара не видно, то можно подумать, что эти люди просто по-приятельски идут все время рядом, другими словами, испытывают некие силы притяжения.

Из данных о ядерных силах Юкава заключил, что мезоны обладают массой покоя, причем эта масса*) примерно в 300 раз больше массы электрона; кроме того, в отличие от фотонов мезоны могут быть как заряженные, так и нейтральные.

Что касается свойств мезонов, то подобно фотонам они будут испускаться и поглощаться отдельными протонами и нейтронами, а при подходящих условиях мезон может породить пару протон-антипротон или нейтрон-антинейтрон. Обратное, нуклон способен аннигилировать со своим

*) Рассуждения, с помощью которых можно получить значение массы мезонов, состоят в общих чертах в следующем. Возможность обмена мезонами подразумевает, что энергия протона или нейтрона имеет неопределенность порядка массы мезона m_{π} . Из принципа неопределенности характеристическое время, соответствующее неопределенности в энергии, равно $\hbar/m_{\pi}c^2$. За это время мезон может пройти расстояние порядка $\hbar/m_{\pi}c$, и это расстояние может быть приравнено радиусу действия ядерных сил. Из известного значения радиуса действия ядерных сил (10^{-13} см) и соотношения $10^{-13} = \hbar/m_{\pi}c$ можно сразу же получить, что $m_{\pi} \approx 300 m_e$.

антинуклоном, причем энергия и импульс аннигилирующих нуклонов переходят к мезонам.

Открытие этих частиц Пауэллом в 1947 г. явилось вехой для теоретического понимания проблемы элементарных частиц; одновременно это открытие послужило вехой и для экспериментальной физики. Дело в том, что этот успех физики был достигнут за счет развития новой техники эксперимента; тем самым было открыто еще одно «окно в природу». Техника, о которой идет речь, заключалась в использовании фотографической эмульсии для регистрации следов заряженных частиц.

Возвращаясь к классификации взаимодействий, разберем несколько подробнее сильные взаимодействия. Сейчас в эту категорию попадают уже следующие частицы:

1) обе ядерные частицы, называемые нуклонами (p , n) и их античастицы;

2) три π -мезона, называемых иногда пионами (π^+ , π^0 , π^-), — положительный, нейтральный и отрицательный.

Как это отмечалось раньше, силы, действующие между этими частицами, значительно превосходят электромагнитные силы. Следовательно, для ядерной физики заряд существен в одном случае из ста. До тех пор пока можно пренебрегать электромагнитными силами, протон и нейтрон

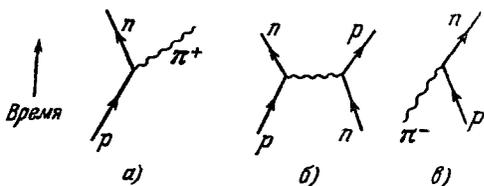


Рис. 6. Взаимодействия между мезоном и нуклоном.

Мезоны изображаются волнистыми линиями; а) протон, испускающий π^+ -мезон, становится нейтроном; б) взаимодействие между протоном и нейтроном, осуществляемое путем обмена мезоном; в) поглощение π^- -мезона протоном приводит к появлению нейтрона. Следует обратить внимание на сходство между мезон-мезонными и фотон-электронными взаимодействиями, изображенными на рис. 1 и 2.

являются тождественными частицами. Аналогично этому тождественны π^+ , π^0 , π^- -мезоны. То, что эти три частицы эквивалентны друг другу, непосредственно подсказывает нам их формальную интерпретацию как трех компонент некоторого вектора трехмерного пространства. Чтобы подчеркнуть различие между этим абстрактным пространством и нашим обычным пространством, мы называем вновь введенное пространство **и з о т о п и ч е с к и м п р о с т р а н с т в о м**. Эквивалентность трех видов π -мезонов в этом случае формально выглядит как симметрия вращения в изотопическом пространстве. Мы уже упоминали о том, что вращения связаны с угловым импульсом и поэтому, по аналогии с обычным пространством, мезонам можно приписать внутренний изотопический спин I_z . Тогда π^+ -мезону соответствует $I_z = +1$, π^0 -мезону $I_z = 0$ и π^- -мезону $I_z = -1$. Поступив так, мы уже стали говорить о трех с о с т о я н и я х одной частицы, именно π -мезона. Распространяя эту аналогию на н у к л о н, который обнаруживается в двух эквивалентных состояниях (протон и нейтрон), мы должны приписать протону $I_z = +\frac{1}{2}$ и нейтрону $I_z = -\frac{1}{2}$. В точности так же, как симметрия относительно вращения в обычном пространстве влечет за собой сохранение углового импульса, симметрия вращения в изотопическом пространстве подразумевает сохранение изотопического спина.

Таким образом, при любом ядерном взаимодействии сохраняются не только энергия, импульс и угловой импульс, но также и изотопический спин. Как это вскоре выяснится, мы должны быть очень осторожны, используя это утверждение. Очевидно, что электромагнитное взаимодействие, поскольку именно оно вводит различие между заряженными и незаряженными частицами и ликвидирует введенный нами е д и н ы й нуклон, ломает всю схему и нарушает симметрию вращения в этом пространстве.

Итак, к нашему списку элементарных частиц нужно добавить еще три частицы. Но снова возникает тот же вопрос, какой вставал и в случае нейтрона: устойчивы ли эти частицы? Мы должны ответить — нет, и распад всех этих трех частиц влечет за собой новые осложнения.

Рассмотрим сначала π^- -мезон. Можно бы было ожидать, что эта частица распадается на электрон и нейтрон. π -мезон виртуально превращается в пару антипротон-нейтрон, и последняя, аннигилируя, образует электрон и нейтрино. По некоторым весьма неясным причинам этот распад происходит крайне редко*). Вместо ожидаемого природа преподносит нам сюрприз, перепутывающий все на свете. π -мезон распадается на новую частицу (мюон) и нейтрино. Новая частица — мюон — примерно в двести раз тяжелее электрона. Сила взаимодействия для этого распада вполне сходна с взаимодействием при распаде нейтрона.

Но мистерия с μ -мезоном вовсе не ограничивается этим. За промежуток времени в 10^{-6} сек мюон спонтанно распадается на электрон и два нейтрино. Количественно дело обстоит так, как будто мы имеем дело с тем же самым взаимодействием, которое ответственно за распад π -мезона. Позже мы увидим, что мюон играет выдающуюся роль в самых последних физических исследованиях. Без всяких колебаний можно утверждать, что мюон самая загадочная частица в современной физике. У нас нет ни одного разумного довода, чтобы оправдать ее существование, мы не можем понять, почему она обладает столь значительной массой.

π^0 - мезон распадается на два γ -кванта примерно в течение 10^{-17} сек. Этот распад сам по себе определяет класс, к которому он принадлежит. Тогда как распад нейтрона и распады π^\pm - и μ^\pm -мезонов попадают в категорию слабых взаимодействий, π^0 -распад относится к электромагнитному взаимодействию, обладающему средней силой; этим и объясняется его соответственно меньшее время жизни. Если n , π^+ и μ^\pm стали бы устойчивыми частицами, когда можно было бы отвлечься от электромагнитного взаимодействия, то в свою очередь π^0 -мезон оказался бы устойчивой частицей, если бы не существовало электромагнитного поля. Снова оказывается, что одни частицы элементарнее других. Имеет ли смысл рассматривать π^0 -мезон как частицу, образованную двумя γ -квантами? Нет, не имеет, во всяком случае когда речь идет о ядерных взаимодействиях, потому что ядерные взаимодействия π^0 -мезонов столь же элементарны, как и взаимодействия π^+ - и π^- -мезонов; все эти три взаимодействия всегда встречаются совместно.

8. ГИПЕРОНЫ И СТРАННЫЕ ЧАСТИЦЫ

Остановимся на мгновение, чтобы еще раз взглянуть на общее положение дел. К 1947 г. список элементарных частиц включал в себя уже четырнадцать представителей: γ , e^\pm , μ^\pm , ν , $\bar{\nu}$, p^+ , n^\pm , π^\pm , π^0 . Чарующая простота недавнего прошлого (перед 1932 г.), когда были экспериментально обнаружены (или подозревалось существование) всего лишь γ , e^\pm , p^\pm , была безвозвратно утеряна. Мы столкнулись с проблемой двух, доселе неизвестных, элементарных сил, действующих в природе: речь идет о ядерных силах и силах взрывного вида, ведущих к ядерным распадам; нам пришлось примириться с тем, что существуют распадающиеся элементарные частицы; и что хуже всего, мы оказались лицом к лицу с дилеммой,

*) Эксперименты, выполненные в 1958 г. в Женеве (CERN), обнаружили, что хотя распад $\pi \rightarrow e + \nu$ в общем и наблюдается, он происходит с частотой, в 10^{-6} раз меньшей, чем распад $\pi \rightarrow \mu + \nu$

заставившей нас принять приближенный закон сохранения (закон сохранения изотопического спина) и, в довершение всех тайн, в нашу жизнь прочно вошел совсем загадочный мюон.

После 1947 г. последовали новые сюрпризы. Вслед за блестящим (и в той части, которая касается теории, совершенно неожиданным) открытием Батлера и Рочестера было обнаружено восемь новых частиц; к этим частицам мы сейчас и переходим. Эти новые частицы разбиваются на две ясно выраженные категории:

1) Шесть частиц, называемые гиперонами, которые тяжелее протонов — Λ^0 , (Σ^+ , Σ^0 , Σ^-) и (Ξ^0 , Ξ^-). Все они неустойчивы и распадаются на протон или нейтрон; распадные силы в количественном отношении вновь подобны силам, ответственным за распады n^- , π^\pm - и μ^\pm -частиц. Поскольку конечным продуктом распада являются либо протоны, либо нейтроны, то в этом случае выполняется закон сохранения для барионов. Теперь этот закон запишется уже так:

$$N_p + N_n + N_\Lambda + N_\Sigma + N_\Xi - (N_{\bar{p}} + N_{\bar{n}} + N_{\bar{\Lambda}} + N_{\bar{\Sigma}} + N_{\bar{\Xi}}) = \text{const.}$$

2) Во вторую категорию входят две частицы с массами, занимающими промежуточное значение между массами нуклонов и π -мезонов. Распады

этих частиц, проходя через различные стадии, оканчиваются на электронах и нейтрино. Эти частицы называются K^\pm - и K^0 -частицами.

Открытие Λ^0 -, K^0 - и Ξ^0 -частиц сделано с помощью камеры Вильсона; заряженные гипероны и K -мезоны наиболее интенсивно изучались с помощью фотографических эмульсий; доказательство существования Σ^0 - и недавно обнаруженного Ξ^0 -гиперонов было дано в работе на пузырьковых камерах, облученных пучками протонов, полученных на ускорителях в Брукхэвене и Беркли. Ускоренные протоны соударялись с ядрами (жидкого) водорода в пузырьковой камере, все детали следов частиц регистрировались следами ионов, образующихся в кильватере всякой частицы, проходящей через камеру.

Эти восемь частиц обнаруживали совершенно неожиданные свойства и в течение ряда лет носили название «странных» частиц. То, что они

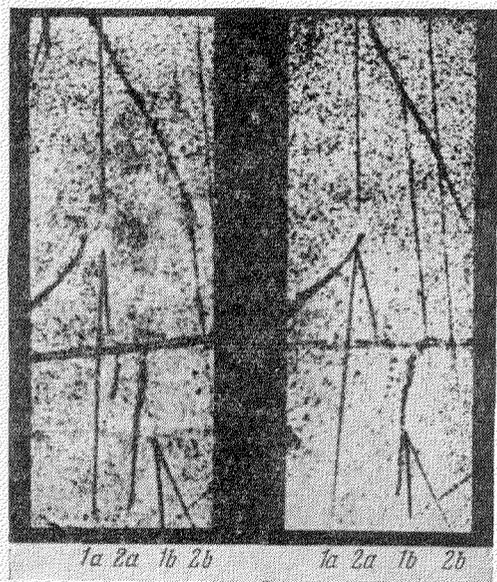


Рис. 7. Стереоскопическая пара фотографий, выполненных в пузырьковой камере, воспроизводящая совместное рождение $\pi^+ + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$.

Треки, отмеченные буквой *a*, воспроизводят последовательный распад Λ^0 , порождающий протон (1*a*) и π^- -мезон (2*a*); треки, отмеченные буквой *b*, соответствуют распаду K^0 на π^- -мезон (1*b*) и π^- -мезон (2*b*).

не появлялись поодиночке, ясно указывало на то, что их взаимодействия в нашем техническом понимании очень велики. Мы уже видели, что для сильного взаимодействия характерной чертой служит возможность введения изотопического спина. Представлялось весьма подходящим приписать ж этим частицам определенные значения изотопического спина и потребо-

вать, чтобы во всех взаимодействиях этих частиц соблюдался закон сохранения изотопического спина. Такая процедура была проделана в 1953 г., частично из теоретических и частично из феноменологических соображений, Гелл-Манном и Нишижимой. Их результаты оказались поистине удивительными. Приведем некоторые из них.

1. Во всех процессах столкновений, где участвуют π -мезоны и нуклоны, странные частицы не только не появляются поодиночке, но во всех случаях их должно быть по меньшей мере две, например $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+_0$. Это явление носит название совместного рождения.

2. Одно и то же соударение $\pi^- + p$ может привести к реакциям $\Lambda^0 + K^0$, $\Sigma^0 + K^0$ и $\Sigma^- + K^+$, но никогда не приводит к реакции $\Sigma^+ + K^-$, несмотря на то, что полный заряд, число тяжелых барионов и т. д. в левой и правой частях реакции одинаковы. Объяснение этого факта с точки зрения закона сохранения изотопического спина следует незамедлительно. Действительно, для левой части реакции $\pi^- + p$ значение $I_z = -1 + \frac{1}{2} = -\frac{1}{2}$ (мы воспользовались для этих частиц значениями I_z , приведенными в таблице на стр. 141).

Например, для частиц $\Sigma^- + K^+$ эта же величина I_z равна $-1 + \frac{1}{2}$, т. е. опять же $-\frac{1}{2}$. Однако для случая $\Sigma^+ + K^-$ величина $I_z = +\frac{1}{2}$, и именно поэтому последняя реакция идти не может.

Последователи Пифагора, узнав о том, что делается сегодня, могли бы с полным правом сказать, что «числа управляют миром», и настолько, насколько мы понимаем сейчас природу, они были бы правы. Стоит отметить, что все предсказания теории Гелл-Манна впоследствии подтвердились.

Подведем итоги тому, что мы узнали.

А. Сильные взаимодействия

Сильные взаимодействия имеют место между p -, n -, Λ^0 -, Σ^0_{\pm} -, Ξ^0 -, π^0, \pm -, K^0 +-частицами и их античастицами. Они характеризуются следующими законами сохранения:

1. Законом сохранения заряда.
2. Законом сохранения числа барионов.
3. Законом сохранения энергии и импульса (симметрия по отношению к трансляциям пространства — времени).
4. Законом сохранения спина (симметрия вращения пространства — времени).
5. Законом сохранения изотопического спина (симметрия вращения изотопического спина). Кроме того,
6. Поведение частиц и античастиц должно быть сходным (симметрия зарядового сопряжения).

Все взаимодействия, которые удовлетворяют этим правилам и могут иметь место, фактически осуществляютя в природе.

Б. Электромагнитные взаимодействия

Взаимодействие средней силы включает в себя электромагнитные взаимодействия всех заряженных частиц.

Эти взаимодействия ответственны за распад π^0 - и Σ^0 -частиц за промежутки времени, меньшие 10^{-17} сек. Законы сохранения, перечисленные для сильного взаимодействия, справедливы и здесь, за исключением 5.

В. Слабые взаимодействия

Слабые взаимодействия ответственны за спонтанный распад всех частиц, за исключением p , e , ν и фотонов. Здесь также справедливы все перечисленные законы сохранения, за исключением B , который характерен только для сильных взаимодействий *).

3. СИММЕТРИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ

Теперь мы подошли к самым последним событиям в физике элементарных частиц, относящимся к январю 1957 г. Мы уже упоминали о трансляционной симметрии пространства — времени, а также о присущей ему симметрии вращения. В добавок к этим видам симметрии имеются еще некоторые свойства симметрии, связанные с пространством и временем. К этим свойствам относятся:

- 1) симметрия пространственного отражения и
- 2) симметрия отражения во времени.

Рассмотрим сначала пространственные отражения или, как их еще называют, зеркальные отражения. Поскольку при отражении в зеркале правая рука превращается в левую, то симметрия относительно зеркальных отражений есть то же самое, что и симметрия между левым и правым. Идея о том, что левое и правое взаимно неразличимы, восходит к Лейбницу, который придал ей точную формулировку. Со времен Лейбница до января 1957 г. мы твердо верили в то, что физические законы не отдают предпочтения ни левому, ни правому.

Давайте придадим точную форму закону пространственного отражения. Подобно тому как Дирак показал, что для всякой частицы должна существовать соответствующая античастица, закон симметрии пространственных отражений утверждает, что если существует некоторая частица, то обязательно должна существовать частица, получаемая зеркальным отражением исходной. Если осуществляется некоторая реакция, то соответствующая реакция, которая получается при наблюдении исходной в зеркало, также физически возможна. Следовательно, если существует правополяризованный электрон, то в природе должен существовать также и левополяризованный электрон. Если существует правополяризованное нейтрино, то должно существовать также левополяризованное нейтрино. Если обратиться к биологии, то мы знаем, что у большинства из нас сердце находится слева. Однако это не опровергает принципа зеркальной симметрии, поскольку встречаются отдельные личности, у которых сердце расположено справа. То обстоятельство, что такие люди представляют

*) Точнее, сильные взаимодействия обладают вращательной инвариантностью для всех вращений в трехмерном изотопическом пространстве, так что сохраняется не только компонента изотопического спина в некотором избранном направлении, но также сохраняется и полный изотопический спин $|T|$. Электромагнитные взаимодействия сохраняют T_z , но не сохраняют T . Слабые взаимодействия не сохраняют ни T_z , ни $|T|$.

Гелл-Манн сформулировал закон сохранения T_2 в иной, но целиком эквивалентной форме. Поскольку величина заряда сохраняется всегда, при любых взаимодействиях, можно рассматривать не сохранение величины T_2 , а ввести новую величину S , определив ее соотношением $S=2(Q-T_2)$ для π - и K -мезонов, $S=2(Q-T_2) - 1$ для тяжелых частиц и $S=0$ для фотонов. Эта величина была названа Гелл-Манном странностью; она принимает следующие значения:

$$S = +1 \text{ для } (K^+, K^0), S = 0 \text{ для } (p, n), (\pi^+, \pi^0, \pi^-) \\ S = -1 \text{ для } (K^0, K^-), S = -2 \text{ для } (\Xi^0, \Xi^-).$$

Сильные и электромагнитные взаимодействия сохраняют S ; в слабых взаимодействиях величина S , по-видимому, меняется на единицу.

меньшинство, является следствием того, что Герман Вейль назвал простой случайностью — следствием асимметрии начальных условий, а отнюдь не асимметрии в фундаментальных законах природы.

Принцип зеркальной симметрии очень заманчив также и с философской точки зрения. Но куда более важным, чем любой философский аргумент, является то, что для всех сильных и электромагнитных взаимодействий он оказывается справедливым. Так, например, при исследованиях электронов, испускаемых раскаленной нитью, было проверено, что обнаруживаются как левополяризованные, так и правополяризованные электроны. Летом 1956 г. Ли и Янг указали на то, что все данные, которыми мы располагали к этому времени, не доказывают, но и не опровергают справедливости этого принципа для слабых взаимодействий; одновременно они предложили серию экспериментов, которые могли бы окончательно решить вопрос. Однако насколько твердой была уверенность, что этот принцип справедлив для всех взаимодействий, можно судить по отрывку письма Паули к Вайскопфу от 17 января 1957 г.:

«Я не верю (*причем не жирно подчеркнуто Паули*) в то, что Бог — слабый левша, и я готов держать пари на крупную сумму за то, что эксперименты дадут результаты, соответствующие наличию симметрии».

Эксперименты были закончены два дня спустя после того, как Паули написал это письмо; после этого они были повторены во всем мире; все они недвусмысленно показали, что в слабых взаимодействиях не существует симметрии между левым и правым. Говоря точнее, эксперименты показали, что левополяризованные нейтрино существуют, а правополяризованных нейтрино в природе нет. Подобно Гофману в известной опере Оффенбаха, рассматривая нейтрино в зеркало, мы ничего не увидим. Грустно думать о том, что все эти результаты могли быть получены уже десять лет назад, потому что все необходимые данные для этого были на всех фотопластинках, на которых был зафиксирован $\pi-\mu-e$ -распад. Если бы существовала симметрия отражения, то равное число электронов испускалось бы в направлениях вперед и назад относительно направления движения μ -мезона. Если бы кто-нибудь взял на себя труд подсчитать эти числа, то он немедленно обнаружил бы асимметрию. 27 января 1957 г. Паули писал:

«Теперь, когда первое потрясение уже миновало, я начинаю приходить в себя. Действительно, все было весьма драматично. Во вторник 21 числа в 8 часов вечера я предполагал прочитать лекцию о нейтринной теории. В 5 часов вечера я получил три экспериментальные работы. Я был потрясен не столько тем, что Бог предпочитает левую руку, сколько тем, что он сохраняет симметрию между левым и правым, когда он проявляет себя сильным. Короче говоря, мне представляется сейчас самой актуальной проблемой выяснение вопроса о том, почему сильные взаимодействия симметричны относительно левого и правого».

Может быть, можно указать более глубокие причины, объясняющие, почему симметрия между левым и правым должна нарушаться, когда испускается нейтрино. Можно показать, что масса покоя, в точности равная нулю, несовместима с симметрией между левым и правым. Хотя мы утратили принцип симметрии, но, возможно, приобрели довольно определенное утверждение относительно массы нейтрино. Однако для тех распадов, в которых не участвуют нейтрино, даже это объяснение нарушения зеркальной симметрии не годится.

Эддингтон задал однажды следующий вопрос: допустим, что мы установили радиосвязь с обитателями какой-то отдаленной звезды; можем ли мы сообщить обитателям этой звезды, какой из двух возможных типов винта мы условились называть правым. Теперь, когда мы установили нарушение принципа пространственного отражения, ответ совершенно ясен. Все, что мы можем сообщить нашим далеким друзьям, так это только то, что наш выбор таков, что нейтрино, испускаемые при распаде нейтрона, обладают правой поляризацией.

10. ОТРАЖЕНИЯ ВРЕМЕНИ

Принцип отражения времени утверждает симметрию между прошедшим и будущим; в наших формулировках он не касается вопросов причинности, а просто предлагает примерно следующие утверждения.

Число K^- - и Σ^- -частиц, возникающих в π^+p -столкновениях, в точности равно числу частиц π^-+p , возникающих при обратных $K^+\Sigma^-$ -столкновениях.

Как и раньше, мы знаем, что этот принцип соблюдается как для сильных, так и для электромагнитных взаимодействий. Есть серьезные основания думать, что этот принцип справедлив и для слабых взаимодействий. То, что этот принцип симметрии, по всей вероятности, окажется универсальным законом, должно приветствоваться по следующей причине. Одно из довольно экзотических утверждений современной теории элементарных частиц состоит в следующем.

Если бы оказалось возможным изменить направление течения времени, то отражениям во времени для данной физической ситуации соответствовала бы (в той части, которая касается физических экспериментов) попросту ситуация, которую можно было бы наблюдать в обычное зеркало, за исключением того, что все частицы должны перейти в античастицы. Таким образом, отражение состояния, соответствующего левополяризованному электрону во времени, означает переход к правополяризованному позитрону. Симметрия относительно отражения времени привела бы к тому, что если в природе существует левополяризованное нейтрино, то в природе должно существовать и правополяризованное антинейтрино. А это именно то, на что, по-видимому, указывают последние эксперименты.

11. НЕЙТРИННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Пожалуй, стоит сформулировать более четко, что означают термины «нейтрино» и «антинейтрино». При нейтронном распаде электрон оказывается всегда левополяризованным (e). Как отмечалось раньше, это резко отличается от случая, когда электроны испускаются раскаленной нитью (электромагнитным образом), где обе поляризации встречаются примерно в одинаковом отношении. Это различие возникает потому, что при слабых взаимодействиях утрачивается зеркальная симметрия. Из закона сохранения углового импульса можно вывести, что нейтральная частица с нулевой массой покоя, сопровождающая электрон при распаде нейтрона, должна быть правополяризованной (ν_R). Этот объект в литературе последних лет получил название «антинейтрино».

Приставка «анти» была использована в случае ν_R , чтобы обеспечить (ожидаемый) закон сохранения лептонов, который утверждает, что если электрон представляет собой лептонную $ч а с т и ц у$, то объект, испускаемый вместе с электроном при распаде нейтрона, оказался бы лептонной $а н т и ч а с т и ц е й$. Приняв эти предположения, можно предсказать,

например, что в π^- -распаде ($\pi^- \rightarrow e + \bar{\nu}$) испускаемый нейтронный объект должен быть правополяризованным (ν_R). Это предсказание еще не было экспериментально подтверждено.

Если симметрия отражения во времени сохраняет свою силу (как это мы ожидаем), то для отраженного во времени процесса антинейтронного распада можно предсказать реакцию $\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e_R^+ + \nu_L$; это означает, что испускаемый нейтронный объект должен иметь левую поляризацию. В соответствии с остальной терминологией вполне оправданно назвать эту частицу «нейтрино».

12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прежде чем подводить итоги, мне хочется сделать несколько общих замечаний. Во-первых, все представления, которые были нами развиты, основывались на предположении о том, что структура пространства и времени именно такова, какой ее принимают в специальной теории относительности. По двум причинам мы не принимали в расчет общую теорию относительности и, забывая о ней, опускали четвертую, наиболее распространенную универсальную силу — силу всемирного тяготения. Первая причина нашего невнимания к гравитационным силам объясняется тем, что они значительно слабее всех тех сил, с которыми нам приходилось сталкиваться. В принятых нами единицах ее величина составляет 10^{-39} , и хотя это может показаться удивительным, полное пренебрежение ее влиянием в физике элементарных частиц является превосходным приближением. Вторая причина, которая была недавно особенно отчетливо указана Вигнером, состоит в том, что хотя нам удалось создать непротиворечивое сочетание специальной теории относительности и квантовой механики, до сих пор у нас еще нет разумного сочетания общей теории относительности и квантовой теории. Когда такое сочетание будет достигнуто, мы получим ключ к разрешению некоторых современных трудностей.

Во-вторых, откуда следует, что существуют только эти частицы? Существуют ли другие частицы, которых мы до сих пор не обнаружили? Для тех частиц, взаимодействие между которыми является сильным, мы твердо уверены, что понимаем глубокие причины, определяющие их существование; эти причины следует искать в пространстве изотопического спина. Все обнаруженные частицы соответствуют представлениям группы изотопических вращений. Почему нужно брать именно эту группу — этого мы не знаем. Но, приняв эту группу, мы, по-видимому, можем сказать, что теперь обнаружены все частицы, которые могут участвовать в сильных взаимодействиях, за исключением, может быть, лишь одной частицы. Однако это — слишком скороналительное утверждение, хотя подобные высказывания в истории физики повторяются снова и снова и всегда оказываются неверными. Я высказал бы его в более мягкой форме, указав, что группа изотопического вращения допускает существование и других частиц, но все они, по-видимому, будут иметь времена жизни, меньшие 10^{-19} сек. Для экспериментального обнаружения этих частиц нужно дождаться определенной техники — нового «окошка в природу», которое со временем наверно удастся открыть. Камера Вильсона, фотографические эмульсии и, наконец, пузырьковые камеры — все эти приборы по своей природе не могут непосредственно обнаружить частицы с временем жизни, меньшим 10^{-13} сек. Конечно, совсем другое дело, если появляются основания предполагать по теоретическим соображениям существование частиц с малым временем жизни, как это было в случае π^0 -мезонов и Σ^0 -частиц. В этом случае можно поставить эксперимент так, чтобы выявить эти частицы по крайней мере косвенно.

Для тех частиц, которые попадают в категории электромагнитных и слабых взаимодействий, мы еще не знаем фундаментальных принципов симметрии, связанных с ними. Вполне возможно, например, что существуют некоторые частицы в сочетании с μ -мезоном. Фактически все, что мы знаем относительно частиц этих двух категорий, так это только то, что их взаимодействие не удовлетворяет некоторым видам симметрии, присущим сильным взаимодействиям. Эти взаимодействия в известном смысле должны играть отрицательную роль. В природе должна существовать некая иерархия в отношении принципов симметрии; некоторые из этих принципов милее других сердцу природы. Однако почему это так?

Количественно мы должны еще дать теоретическое объяснение отношению масс частиц и (что значительно более сложно) дать обоснование фактической интенсивности взаимодействий — отношению $1 : 10^{-2} : 10^{-12}$. На более привычном языке — это в точности та же проблема, что и выяснение того, почему безразмерная константа e^2/hc равна $1/137$. Самая глубокая проблема из всех — перед лицом всего многообразия частиц выяснить, что является критерием элементарности. Все ли из приведенных в таблице шестнадцати частиц элементарны или же некоторые из них должны рассматриваться как сложные частицы, образованные «настоящими» элементарными частицами.

Одна из последних попыток решить эту проблему принадлежит Гейзенбергу, который нашел необходимым ввести в физику новые и смелые идеи для того, чтобы осуществить намеченную им программу. Гейзенберг постулировал, что пространство и время не образуют непрерывного многообразия, но что существует фундаментальная длина, много меньшая любой длины, которую когда-либо нам пришлось использовать, и обладающая тем свойством, что на расстояниях, меньших этой длины, невозможны никакие, даже мысленные эксперименты.

Попытка Гейзенберга оказалась успешной лишь отчасти; правильнее всего сказать, что в настоящее время убедительного критерия элементарности у нас нет. Но вся ситуация может измениться буквально мгновенно, когда интуитивно будет найден нужный путь, как это было, скажем, в 1926 г., когда создавалась нерелятивистская квантовая теория. И я глубоко убежден в том, что так и будет.
